

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

САПЕГІН ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 629.7:517.9

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ВИЗНАЧЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ ОРІЄНТАЦІЇ ДЛЯ БЕЗПЛАТФОРМНОЇ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ
НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**

05.11. 03 – Гіроскопи та навігаційні системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Аврутов Вадим Вікторович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського”, доцент кафедри приладів і систем
орієнтації і навігації

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Чіковані Валерій Валеріанович,
Національний авіаційний університет, професор
кафедри систем управління літальних апаратів

кандидат технічних наук
Некрасова Марія Володимирівна,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», доцент
кафедри комп’ютерного моделювання процесів
і систем

Захист відбудеться «11» травня 2021 р. о 14 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 317-1.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «9» квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., доцент



Ю. В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Забезпечення високої надійності систем керування рухомих об'єктів, експлуатація яких характеризується автономністю, складністю траєкторій руху, неповнотою контролю зовнішніх впливів, варіацією умов і режимів функціонування, є важливою науково-технічною проблемою світового рівня. Для її вирішення використовуються комплексні підходи для підвищення точності та розширення функціональних можливостей апаратного, методичного та алгоритмічного забезпечення систем керування при зменшенні масогабаритних характеристик самих об'єктів керування. Важливою складовою сучасних систем керування є безплатформні інерціальні навігаційні системи (БІНС), у яких блок інерціальних чутливих елементів (ЧЕ) жорстко закріплений у корпусі, що пов'язаний з осями об'єкта, а опорна (географічна) система координат (СК) моделюється аналітично. Для визначення орієнтації пов'язаної з об'єктом системи координат відносно опорної в БІНС використовується безплатформна система орієнтації (БІСО), точність якої значною мірою обумовлює точність визначення навігаційних параметрів у БІНС. Головними факторами підвищення точності БІСО є використання прецизійних чутливих елементів, застосування початкового та поточного калібрування вимірювальних модулів, використанням ефективних методів математичної обробки даних від різних датчиків і ефективних алгоритмів фільтрації та компенсації похибок.

Поточна орієнтація об'єкту визначається шляхом чисельного інтегрування кінематичних рівнянь. У сучасних високоточних системах використовуються кватерніонні кінематичні параметри орієнтації і алгоритми інтегрування кінематичного рівняння з вектором Ейлера. Але такий підхід обумовлює складність синтезу алгоритмічно-програмного забезпечення інерціальних систем, призводить до неоднозначності визначення орієнтації об'єкту, не забезпечує високої точності визначення орієнтації при довільному русі об'єкта, що є важливим для виконання ними поставлених завдань.

Тому обґрунтування та розробка нових високоточних методів визначення кінематичних параметрів орієнтації є важливим та актуальним завданням для підвищення точності та забезпечення ефективної інерціальної навігації з використанням БІНС при довільному русі об'єктів зі складною динамікою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації відповідно до Постанови Кабінету міністрів України №942 від 07.09.2011 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року», згідно Розпорядження Кабінету Міністрів України № 600-р від 30.08.2017 р. про Перелік критичних технологій у сфері виробництва озброєння та військової техніки наукового напрямку КПІ ім. Ігоря Сікорського «Розробка методів побудови і дослідження навігаційних приладів і систем на нових фізичних принципах та технологій їх застосування», а також у рамках науково-технічної роботи «Розробка алгоритмів початкової виставки і виставки у польоті безплатформової інерціальної навігаційної систе-

ми» (№489/6) у якій автор був виконавцем. Робота виконувалась відповідно до задач основного науково-технічного напрямку досліджень кафедри приладів і систем орієнтації і навігації.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення точності безплатформної інерціальної навігаційної системи шляхом розробки та впровадження нових високоточних методів визначення кінематичних параметрів орієнтації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- 1) на основі аналізу проблеми в літературних джерелах визначити актуальні методи калібрування інерціальних вимірювачів та визначення орієнтації об'єкту;
- 2) обґрунтувати методи чисельного інтегрування кінематичних рівнянь орієнтації;
- 3) розробити імітаційну модель безплатформної інерціальної системи орієнтації та провести моделювання з метою дослідження точності алгоритмів інтегрування;
- 4) розробити інформаційну модель безплатформної інерціальної системи орієнтації, що включає в себе блок калібрування вихідних сигналів інерціальних вимірювачів, процедуру початкової виставки системи та метод чисельного інтегрування кінематичного рівняння;
- 5) провести експериментальне дослідження отриманих високоточних алгоритмів на реальних системах орієнтації;
- 6) впровадити результати дослідження.

Об'єктом дослідження є процес визначення параметрів орієнтації безплатформною інерціальною навігаційною системою.

Предметом дослідження є методи і алгоритми калібрування чутливих елементів та чисельного інтегрування кінематичних рівнянь орієнтації безплатформною інерціальною навігаційною системою.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувалися фундаментальні методи інерціальної навігації та теоретичної механіки. При дослідженні точності методів калібрування використовувалися методи найменших квадратів та теорії ймовірності. При дослідженні методів чисельного інтегрування використані методи поліноміальної інтерполяції. Імітаційне моделювання виконувалося у програмному середовищі Matlab.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше обґрунтовано і розроблено інформаційну модель безплатформної інерціальної системи орієнтації, що містить процедури просторового калібрування блоку інерціальних вимірювачів та початкової виставки системи, а також чисельне інтегрування матричного кінематичного рівняння Пуассона з використанням сигналів реальних інерціальних вимірювальних модулів.
2. Вдосконалено математичну модель, що аналітично описує величини дрейфу похибки методу чисельного інтегрування внаслідок конічного руху основи від параметрів руху, кроку опитування чутливих елементів та порядку методу.
3. Вперше запропоновано та обґрунтовано метод компенсації алгоритмічних дрейфів безплатформної інерціальної системи орієнтації при конічному русі основи,

що полягає у відніманні розрахованого аналітично значення алгоритмічного дрейфу системи від поточного значення нерухомого кута на кроці інтегрування.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для проведення процедури просторового калібрування інерціального вимірювального модуля (ІВМ) безплатформних систем орієнтації і навігації.

2. Отримано інформаційну модель кінчного дрейфу алгоритму чисельного інтегрування, що дозволяє проводити компенсацію похибки алгоритму БІСО.

3. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для проведення імітаційного моделювання роботи БІСО, що включає в себе калібрування вихідних сигналів ІВМ, проведення процедури початкової виставки системи та чисельного інтегрування кінематичних рівнянь орієнтації об'єкту.

4. Підтверджена працездатність та ефективність розробленого програмного забезпечення на реальних сигналах прецизійних ІВМ.

Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення захищено авторськими свідоцтвами України на твір.

Результати дослідження мають практичне впровадження. Алгоритми чисельного інтегрування кватерніонного рівняння орієнтації об'єкту були використані при розробці програмного забезпечення безплатформної інерціальної навігаційної систем в рамках науково-технічної роботи «Розробка алгоритмів початкової виставки і виставки у польоті безплатформової інерціальної навігаційної системи» для КБ «Південне». Розроблений алгоритм чисельного інтегрування кінематичного рівняння Пуассона та досліджений метод просторового калібрування інерціального вимірювального модуля було впроваджено в КП СІБ «Арсенал» (м. Київ) при синтезі програмного забезпечення для безплатформної інерціальної навігаційної системи та при проведенні калібрування її чутливих елементів. Отримане алгоритмічне та програмне забезпечення для безплатформної системи орієнтації було впроваджено на ТОВ «Гіротех» та АТ «Елміз» при модернізації безплатформних систем орієнтації і навігації. Алгоритмічне та програмне забезпечення використовується в навчальному процесі кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при проектуванні алгоритмів інерціальних систем.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором самостійно. Автором розроблено програмне забезпечення для проведення імітаційного моделювання процедури калібрування прецизійних акселерометрів та гіроскопів. Проведено ретельне дослідження точності нового методу просторового калібрування.

Автором проаналізовано основні підходи при синтезі алгоритмів чисельного інтегрування кінематичних рівнянь орієнтації. Показано основні типи кінематичних параметрів, що використовуються в наш час та встановлено взаємозв'язки між ними, проаналізовано їх переваги і недоліки. Наведено основні кінематичні рівняння орієнтації, що використовуються зараз на практиці. Створено імітаційну модель безплатформної інерціальної системи орієнтації для дослідження різноманітних ал-

горитмів інтегрування. У результаті було сформульовано методику, що дозволяє проводити порівняльний аналіз алгоритмів чисельного інтегрування різноманітних кінематичних рівнянь. На основі великої кількості емпіричних даних сформовано математичну модель алгоритмічного дрейфу системи орієнтації за умови кінчного руху основи. Використовуючи цю модель сформульовано метод корекції алгоритмічного дрейфу.

Розроблено алгоритм безплатформної інерціальної системи орієнтації з використанням сигналів реальних високоточних лазерних гіроскопів та навігаційних акселерометрів вітчизняного виробництва.

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто автором виконано: імітаційне моделювання скалярного [2] та просторового [5] методів калібрування інерціального вимірювального модуля; у роботі [24] обговорюється можливість калібрування прецизійних датчиків кутової швидкості на нерухомій основі; досліджено точність розроблених методів Рунге–Кутти і Пікара інтегрування кінематичних рівнянь Пуассона [1] та у кватерніонах [9] та отримано емпіричну залежність алгоритмічного дрейфу системи під час кінчного руху основи; в чисельних роботах [3, 4, 6, 7, 16–23] представлено результати синтезу та імітаційного моделювання безплатформних систем орієнтації з використанням різноманітних методів чисельного інтегрування та вихідних сигналів датчиків кутової швидкості; робота [25] присвячена дослідженню алгоритмічного дрейфу системи орієнтації у ході кінчного руху основи; у роботі [27] проведено аналіз швидкодії методів чисельного інтегрування Рунге–Кутти для кватерніонного кінематичного рівняння і матриці напрямних косинусів; роботи [7, 28–30] присвячено розширенню розглянутих алгоритмів безплатформних систем орієнтації та введенню корекції постійних дрейфів гіроскопів фільтром Маджвіка і комплементарним фільтром; у роботах [8, 14, 15] використовуються розроблені методи визначення поточної орієнтації об'єкту для розрахунку місцевих широти і довготи на нерухомій основі та у випадку вібрації; на програмне забезпечення було отримано авторські свідоцтва [10–13].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на наступних конференціях, конгресах, з'їздах, семінарах, нарадах: XXIX conference Vibrations in Physical Systems, м. Познань, 2020 р.; IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, м. Київ, 2020 р.; International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020», м. Львів; міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування : стан і перспективи”, м. Київ, 2015 – 2018 рр. та 2020 р; всеукраїнська науково-практична конференція «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ 2019 та 2020 рр. міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси”, м. Київ, 2015, 2016, 2020 рр.; другий Українській науково-технічній конференції «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи», м. Київ 2016 р.; дев'ятій міжнародній науково-технічній конференції «Приборостроение», м. Мінськ, 2016 р.; десятий міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених і студентів «Новые направления развития приборостроения» м. Мінськ, 2017 р.; міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій», м. Тернопіль,

2019 р.; міжнародній науковій конференції «Проблеми та перспективи реалізації та впровадження міждисциплінарних наукових досягнень», м. Київ, 2020 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 30 робіт, серед яких 9 статей у провідних фахових виданнях, з них 1 стаття у виданні країни ЄС та 8 статей у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз, 4 авторські свідоцтва України на твір, 17 тез доповідей міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, огляду стану проблеми і постановки задачі дослідження, 5 розділів, загальних висновків по роботі, списку використаних джерел із 133 найменувань та 7 Додатків. Дисертаційна робота викладена на 227 сторінках, основний зміст роботи становить 196 сторінок друкованого тексту, в тому числі 101 рисунок і 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі виконується обґрунтування вибору теми дослідження, актуальності розробки методів та алгоритмів для визначення кінематичних параметрів орієнтації безплатформних інерціальних навігаційних систем. Визначається зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну одержаних результатів та їх практичне значення, наводяться дані про апробацію та публікації результатів роботи, висвітлено особисту участь здобувача.

У першому розділі проведено інформаційно-аналітичний огляд літературних джерел та показано сучасний стан розвитку наукової теорії інерціальної навігації.

Сучасні інерціальні навігаційні системи майже повністю перейшли до безплатформної ідеології, коли інерціальний вимірювальний модуль жорстко закріплений у корпусі приладу. Це у значній мірі спрощує конструкцію, проте вимагає точного визначення орієнтації зв'язаної з об'єктом системи координат відносно базової (як правило географічної). Саме цю задачу виконує підсистема БНС, яку в літературі називають безплатформною інерціальною системою орієнтації. Її точність у значній мірі впливає на точність усієї навігаційної системи.

На основі огляду літературних джерел встановлено, що алгоритм роботи БІСО має складатися із процедур калібрування ЧЕ ІВМ, початкової виставки та чисельного інтегрування кінематичного рівняння орієнтації.

Проведений огляд сучасних підходів до реалізації процедур калібрування ІВМ показав, що існуючі векторні і скалярні методи забезпечують високу точність калібрування сигналів ЧЕ, проте займають дуже тривалий час і не повно використовують можливості сучасного стендового обладнання.

Проаналізовані роботи за темою дослідження показали, що більшість з них ґрунтуються на використанні класичних методів чисельного інтегрування кінематичних рівнянь: методів Панова четвертого порядку точності, методів Рунге–Кутти, методів прогнозу-корекції та прямокутників. Однак, не було запропоновано методів, що забезпечували б точність систем орієнтації при впровадженні більш точних ЧЕ. Найбільш розповсюдженим підходом для оцінки кутового положення об'єкта є використання кватерніонного рівняння орієнтації з розрахунком на кроці інтегрування значення приросту параметрів вектора Ейлера, що значно ускладнює синтез і роботу

алгоритмічно-програмного забезпечення БІСО та БІНС. При цьому, вибір цих кінематичних параметрів продиктований мінімальною кількістю їх елементів, тобто забезпеченням якомога більшої швидкодії бортового обчислювача. Разом із цим, не враховується можлива неоднозначність визначення поточної орієнтації. Крім того, БІСО часто використовуються на високоманеврених об'єктах, рух яких часто містить складові кінцевого руху, який викликає появу небезпечного алгоритмічного дрейфу при інтегруванні кінематичних рівнянь. Сучасні засоби боротьби з цим дрейфом, такі як підвищення точності методів, чи емпіричних підбір коефіцієнтів алгоритму інтегрування не є оптимальними.

Таким чином актуальною задачею вдосконалення сучасних БІСО є впровадження нових методів чисельного інтегрування кінематичних рівнянь, які давали б змогу однозначно та з високою точністю визначати орієнтацію об'єкту. У попередніх дослідженнях авторів за цим напрямом дана проблематика розкрита в недостатній мірі, тому представлена робота передбачає вдосконалення відомих методів за рахунок використання сучасних досягнень інформаційних технологій.

У другому розділі проведено аналіз існуючих підходів до калібрування чутливих елементів, що використовуються в інерціальній навігації.

Найбільш розповсюдженими на практиці є метод тестових поворотів для калібрування блоку акселерометрів та метод калібрування гіроскопів на одновісному поворотному стенді. Проведено дослідження точності цих методів калібрування у порівнянні з новим просторовим методом, який ґрунтується на одночасному повороті ІМВ навколо трьох осей.

Використано такі моделі вихідних сигналів:

- для акселерометрів

$$\begin{bmatrix} U_{ax} \\ U_{ay} \\ U_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ax} \\ B_{ay} \\ B_{az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ax} \\ n_{ay} \\ n_{az} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де позначено U_{ax}, U_{ay}, U_{az} – вихідні сигнали акселерометрів, B_{ax}, B_{ay}, B_{az} – нульові сигнали, a_x, a_y, a_z – проекції уявного прискорення, k_{11}, k_{22}, k_{33} – масштабні коефіцієнти, решта елементів матриці 3×3 – коефіцієнти перехресної чутливості, n_{ax}, n_{ay}, n_{az} – шуми вимірювань.

- для гіроскопів

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x} \\ U_{\omega y} \\ U_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\omega x} \\ B_{\omega y} \\ B_{\omega z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{\omega x} \\ n_{\omega y} \\ n_{\omega z} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де позначено $U_{\omega x}, U_{\omega y}, U_{\omega z}$ – вихідні сигнали акселерометрів, $B_{\omega x}, B_{\omega y}, B_{\omega z}$ – нульові сигнали, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції кутової швидкості обертання основи, s_{11}, s_{22}, s_{33} – масштабні коефіцієнти кожного гіроскопа, решта елементів матриці 3×3 – коефіцієнти перехресної чутливості, $n_{\omega x}, n_{\omega y}, n_{\omega z}$ – шуми вимірювань.

Для опису методів калібрування покладено, що отриманий вихідний сигнал за тривалий час вимірювання у кожному калібрувальному положенні осереднюється, тому у рівняннях (1) та (2) можна знехтувати шумовими складовими.

Відомо, що метод тестових поворотів виконується для восьми калібрувальних положень стенду з встановленим на ньому ІВМ. Нульові сигнали відповідних акселерометрів, масштабні коефіцієнти та коефіцієнти перехресної чутливості розраховуються окремо за відповідними сигналами датчиків у визначених положеннях.

При калібруванні гіроскопів на одновісному поворотному стенді отримується матриця сигналів ЧЕ при обертанні із заданими кутовими швидкостями. Матриця калібрувальних параметрів отримується методом найменших квадратів.

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{A}_i^T \cdot (\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{A}_i^T)^{-1}, \quad (3)$$

де i – номер осі ІВМ; \mathbf{B}_i – матриця вихідних сигналів гіроскопів у кожному положенні; \mathbf{A}_i – матриця із відповідних кутових швидкостей обертання стенду; \mathbf{X}_i – матриця зміщень нулів гіроскопів, масштабних коефіцієнтів та коефіцієнтів перехресної чутливості.

У ході просторового калібрування відбувається одночасний поворот ІВМ навколо трьох осей. Це дає можливість значно скоротити час виконання процедури калібрування. Крім того, матриці калібрувальних коефіцієнтів і для акселерометрів і для гіроскопів розраховуються методами найменших квадратів:

- для акселерометрів

$$\hat{\mathbf{X}}_1 = (\mathbf{G}_{n \times 4}^T \mathbf{G}_{n \times 4})^{-1} \mathbf{G}_{n \times 4}^T \mathbf{U}_{a1}, \quad (4)$$

де позначено

$$\mathbf{U}_{a1} = \begin{bmatrix} U_{ax1} & U_{ay1} & U_{az1} \\ U_{ax2} & U_{ay2} & U_{az2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{axn} & U_{ayn} & U_{azn} \end{bmatrix} \text{ – осереднені сигнали акселерометрів;}$$

$$\mathbf{G}_{n \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ 1 & a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} \end{bmatrix} \text{ – проєкції уявного прискорення; } \mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} B_{ax} & B_{ay} & B_{az} \\ k_{11} & k_{21} & k_{31} \\ k_{12} & k_{22} & k_{32} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix} \text{ –}$$

матриця калібрувальних коефіцієнтів акселерометрів;

- для гіроскопів

$$\hat{\mathbf{X}}_3 = (\boldsymbol{\omega}_{n \times 4}^T \boldsymbol{\omega}_{n \times 4})^{-1} \boldsymbol{\omega}_{n \times 4}^T \mathbf{U}_{\omega 3}, \quad (5)$$

де

$$\mathbf{U}_{\omega 3} = \begin{bmatrix} U_{\omega x1} & U_{\omega y1} & U_{\omega z1} \\ U_{\omega x2} & U_{\omega y2} & U_{\omega z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{\omega xn} & U_{\omega yn} & U_{\omega zn} \end{bmatrix} \text{ – осереднені сигнали гіроскопів;}$$

$$\omega_{n \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{x1} & \omega_{y1} & \omega_{z1} \\ 1 & \omega_{x2} & \omega_{y2} & \omega_{z2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \omega_{xn} & \omega_{yn} & \omega_{zn} \end{bmatrix} \text{ – проекції кутової швидкості стенду;}$$

$$\mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} B_{\omega x}^* & B_{\omega y}^* & B_{\omega z}^* \\ s_{11} & s_{21} & s_{31} \\ s_{12} & s_{22} & s_{32} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} \end{bmatrix} \text{ – калібрувальні коефіцієнти гіроскопів.}$$

Для перевірки працездатності методу просторового калібрування та для оцінки його точності було створено імітаційну модель у середовищі Matlab. В ній реалізовано процедури калібрування ІМВ розглянутими методами. Для оцінки адекватності моделі зроблено припущення, що за відсутності будь-яких інструментальних похибок стендового обладнання та ЧЕ на точність процедури будуть впливати лише методичні фактори та похибки машинного обчислення. Очевидно, якщо визначена похибка досліджуваного методу калібрування буде в межах розрахункових можливостей середовища Matlab, то імітаційна модель працює адекватно.

У реальних умовах при проведенні калібрування існує низка суто інструментальних факторів, які впливають на кінцеву точність вихідного сигналу ІВМ:

- похибки стендового обладнання;
- похибки датчиків.

Перша група похибок визначається неможливістю абсолютно точно виставити платформу стенду у необхідне, задане процедурою, положення та підтримувати стабільну кутову швидкість обертання. І справді, виробники стендово-випробувальної апаратури завжди зазначають ці похибки у специфікаціях виробу. Крім того, при проведенні калібрування ІВМ закріплюється на стенді з додатковою похибкою – вимірювальні осі чутливих елементів не співпадають з осями стенду. Стендові похибки намагаються компенсувати проведенням калібрування у декількох положеннях.

До інструментальних похибок датчиків можна віднести нестабільності зміщень нулів та масштабних коефіцієнтів, а також власні шуми вимірювачів. У математичних моделях акселерометрів (1) та гіроскопів (2) вони не враховуються. Розширимо модель (1) найбільш вагомими інструментальними похибками датчиків:

$$\begin{aligned} U_{ax} &= (1 + \Delta k_x) k_{11} a_x + k_{12} a_y + k_{13} a_z + B_{ax} + \Delta B_{ax} + n_{ax}; \\ U_{ay} &= k_{21} a_x + (1 + \Delta k_y) k_{22} a_y + k_{23} a_z + B_{ay} + \Delta B_{ay} + n_{ay}; \\ U_{az} &= k_{31} a_x + k_{32} a_y + (1 + \Delta k_z) k_{33} a_z + B_{az} + \Delta B_{az} + n_{az}; \end{aligned} \quad (6)$$

де позначено U_{ax}, U_{ay}, U_{az} – вихідні сигнали акселерометрів, B_{ax}, B_{ay}, B_{az} – нульові сигнали, a_x, a_y, a_z – проекції уявного прискорення, k_{11}, k_{22}, k_{33} – масштабні коефіцієнти, решта елементів матриці 3×3 – коефіцієнти перехресної чутливості, $\Delta k_x, \Delta k_y, \Delta k_z$ – нестабільність масштабних коефіцієнтів акселерометрів,

$\Delta B_{ax}, \Delta B_{ay}, \Delta B_{az}$ – нестабільність зміщення нуля, n_{ax}, n_{ay}, n_{az} – шуми акселерометрів.

Аналогічно, розширимо модель вихідного сигналу блоку гіроскопів (2):

$$\begin{aligned} U_{\omega x} &= (1 + \Delta s_x) s_{11} \omega_x + s_{12} \omega_y + s_{13} \omega_z + B_{\omega x} + \Delta B_{\omega x} + n_{\omega x}; \\ U_{\omega y} &= s_{21} \omega_x + (1 + \Delta s_y) s_{22} \omega_y + s_{23} \omega_z + B_{\omega y} + \Delta B_{\omega y} + n_{\omega y}; \\ U_{\omega z} &= s_{31} \omega_x + s_{32} \omega_y + (1 + \Delta s_z) s_{33} \omega_z + B_{\omega z} + \Delta B_{\omega z} + n_{\omega z}; \end{aligned} \quad (7)$$

де позначено $U_{\omega x}, U_{\omega y}, U_{\omega z}$ – вихідні сигнали гіроскопів, $B_{\omega x}, B_{\omega y}, B_{\omega z}$ – нульові сигнали, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції кутової швидкості стенду, s_{11}, s_{22}, s_{33} – масштабні коефіцієнти, решта елементів матриці 3×3 – коефіцієнти перехресної чутливості, $\Delta s_x, \Delta s_y, \Delta s_z$ – нестабільність масштабних коефіцієнтів гіроскопів, $\Delta B_{\omega x}, \Delta B_{\omega y}, \Delta B_{\omega z}$ – нестабільність зміщення нуля, $n_{\omega x}, n_{\omega y}, n_{\omega z}$ – шуми датчиків.

Передбачається, що записуючи вихідний сигнал датчиків протягом тривалого часу (до 100 с) у визначеному методикою положенні, а потім осереднюючи його для калібрування, можна позбавитись впливу випадкових шумових складових похибок датчиків. Проте в реальності похибки датчиків можуть сягати значних величин, тому доцільно дослідити їх вплив на точність процедури калібрування.

Вважатимемо, що похибки обладнання та датчиків є сталими в рамках одного калібрувального положення.

Дослідження точності методів доцільно провести на розробленому програмному забезпеченні шляхом імітаційного моделювання за схемою, наведеною на рис.1.

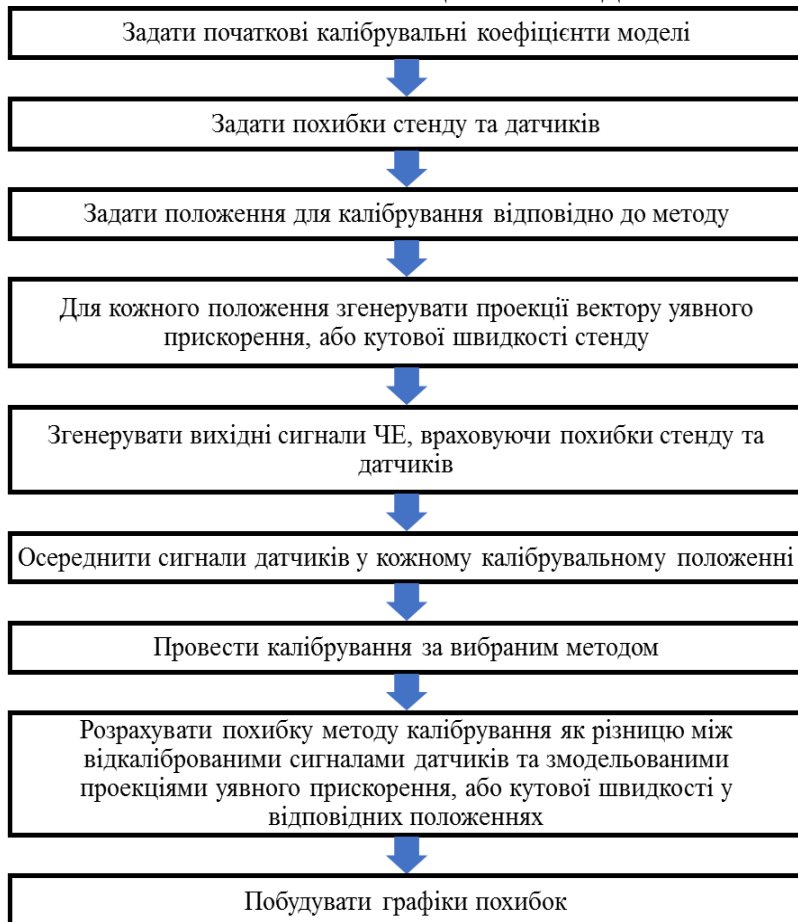


Рис.1 Схема дослідження методів калібрування

Більшість розглянутих інструментальних похибок мають випадковий характер, тому доцільно провести серію із двохста моделювань процедури калібрування та визначити середнє значення похибки. Оцінювалися середні значення похибок методу калібрування в залежності від окремого інструментального фактору, та їхнє середньоквадратичне відхилення.

Результати дослідження дозволили розрахувати можливі похибки калібрування навігаційного акселерометра АКС-05н виробництва КП СПБ «Арсенал». У таблиці 1 наведено результати дослідження для відомих характеристик акселерометру.

Таблиця 1. Середньоквадратичне відхилення похибки акселерометрів

Похибка методу, m/c^2	Нестабільність зміщення нуля, $(\Delta B_A = 50 \text{ ppm})$	Нестабільність масштабного коефіцієнту $(\Delta K = 146 \text{ ppm})$	Середньоквадратичне відхилення шуму $(\sigma_{nA} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м / с}^2)$
Тестові повороти	$1,4104 \cdot 10^{-6}$	$1,3488 \cdot 10^{-5}$	$9,7663 \cdot 10^{-4}$
Просторове	$1,8804 \cdot 10^{-6}$	$2,8420 \cdot 10^{-5}$	$12,8182 \cdot 10^{-4}$

Оскільки похибки методу мають випадковий характер, знайдемо сумарну похибку, як геометричну суму похибок:

- метод тестових поворотів $\sigma_{\Sigma} = 9,7643 \cdot 10^{-4} \text{ м / с}^2$;
- просторове калібрування акселерометрів $\sigma_{\Sigma} = 12,8210 \cdot 10^{-4} \text{ м / с}^2$.

Аналогічні результати отримано і для кільцевого лазерного гіроскопа RL-28 виробництва КП СПБ «Арсенал». Таблиця 2 містить результати дослідження при відомих характеристиках гіроскопу:

Таблиця 2. Середньоквадратичне відхилення похибки гіроскопів

Похибка методу, $^{\circ}/c$	Нестабільність зміщення нуля, $(\Delta B_{\omega} = 0,005 \text{ } ^{\circ}/\text{год})$	Нестабільність масштабного коефіцієнту, $(\Delta s = 3 \text{ ppm})$	Випадковий шум $(\sigma_{n\Omega} = 30 \text{ } ^{\circ}/\text{год})$
Одновісне	$1,6098 \cdot 10^{-4}$	$4,4332 \cdot 10^{-6}$	$3,0121 \cdot 10^{-4}$
Просторове	$1,0628 \cdot 10^{-4}$	$1,4812 \cdot 10^{-5}$	$1,9322 \cdot 10^{-4}$

Похибки методу також мають випадковий характер, тому знайдемо сумарну похибку, як геометричну суму похибок:

- одновісне калібрування ДКШ $\sigma_{\Sigma} = 3,4155 \cdot 10^{-4} \text{ } ^{\circ}/c$;
- просторове калібрування ДКШ $\sigma_{\Sigma} = 2,2102 \cdot 10^{-4} \text{ } ^{\circ}/c$.

Дослідження показують, що для реальних ЧЕ сумарна похибка просторового калібрування на 23,8% більше за тестові повороти. Однак, у випадку калібрування гіроскопів, сумарна похибка просторового методу нижче на 35,8%. Отримані результати дозволяють використати метод просторового калібрування при синтезі інформаційної моделі БІСО та БІНС.

У третьому розділі проведено аналіз кінематичних рівнянь орієнтації та методів їхнього чисельного інтегрування, що використовуються при синтезі алгоритмічного та програмного забезпечення БІСО.

У якості основної використано кінематику кутів Ейлера–Крилова, показану на рис.2. У сучасній теорії інерціальної навігації набули поширеного використання три кінематичні параметри для опису орієнтації зв'язаної СК відносно базової:

- 1) матриця напрямних косинусів (МНК);
- 2) параметри вектору Ейлера єдиного повороту;

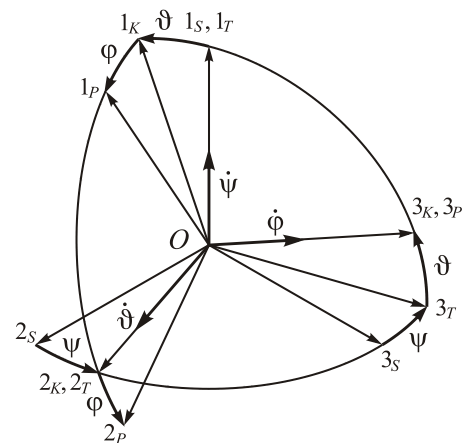


Рис. 2 Послідовність поворотів Ейлера–Крилова

3) кватерніон повороту.

Відповідно цим параметрам формуються кінематичні рівняння орієнтації – диференціальні рівняння, що пов'язують проекції кутової швидкості тіла, рух якого досліджується, на осі тої чи іншої системи координат з похідними від параметрів повороту. Ними є:

1) матричне рівняння Пуассона

$$\frac{d\mathbf{C}^{SP}}{dt} = \mathbf{C}^{SP} \cdot (\boldsymbol{\omega}_P^{PS} \times); \quad (8)$$

2) рівняння Борца

$$\frac{d\boldsymbol{\phi}}{dt} = \boldsymbol{\omega}_P^{PS} + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\phi} \times) \boldsymbol{\omega}_P^{PS} + \frac{1 - \frac{\delta}{2} \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2}}{\delta^2} (\boldsymbol{\phi} \times)(\boldsymbol{\phi} \times) \boldsymbol{\omega}_P^{PS}; \quad (9)$$

3) кватерніонне рівняння орієнтації

$$\frac{d\mathbf{Q}^{SP}}{dt} = \frac{1}{2} \mathbf{Q}^{SP} \circ \boldsymbol{\Omega}_P^{PS}; \quad (10)$$

тут позначено \mathbf{C}^{SP} – МНК між базовою СК S та зв'язаною з об'єктом P ; $\boldsymbol{\omega}_P^{PS}$ – вектор з проекцій кутової швидкості, що вимірюють гіроскопи; $(\boldsymbol{\omega}_P^{PS} \times)$ – кососиметрична матриця з проекцій кутових швидкостей; $\boldsymbol{\phi}$ – вектор Ейлера; δ – кут Ейлера; \mathbf{Q}^{SP} – кватерніон повороту від СК S до зв'язаної P ; $\boldsymbol{\Omega}_P^{PS}$ – вектор-кватерніон, скалярна частина якого дорівнює нулю, а векторна складається з проекцій $\boldsymbol{\omega}_P^{PS}$.

Кожен з кінематичних параметрів, а отже і кожне рівняння, мають свої переваги та недоліки. У сучасних системах майже не використовується рівняння Пуассона так як воно містить дев'ять елементів матриці, що вимагало використання значних ресурсів бортових обчислювачів. Високоточні БІСО, як правило, ґрунтуються на використанні кватерніона для опису орієнтації, проте його приріст розраховується за результатами інтегрування рівняння Борца (9). Таким чином до початкового значення кватерніона додається приріст вектору Ейлера на кроці інтегрування, що перераховується у кватерніон. Звичайно, усі кінематичні параметри описують взаємну орієнтацію однакових СК і кожен з цих параметрів можна виразити через інші. Крім того, математичний апарат для методів чисельного інтегрування рівняння Борца (9) добре розроблений і широко використовується. Проте воно вироджується при $\delta = 0$, що може призвести до невизначеності орієнтації. Крім того, необхідність постійного переходу від вектору Ейлера до кватерніона на кожному кроці інтегрування ускладнює розробку алгоритмічного та програмного забезпечення, негативно впливає на швидкодію. Натомість, використання матричного рівняння Пуассона (8) дозволяє позбавитись цих недоліків. Воно однозначно дозволяє описати орієнтацію зв'язаної СК і не вироджується.

Яке б кінематичне рівняння не використовувалося, воно не має аналітичного розв'язку, тому необхідно використовувати алгоритми чисельного інтегрування.

Для систем низької точності, що будуються на мікромеханічних ЧЕ можна використовувати методи низької точності: прямокутників та трапецій. Часто застосову-

ються методи Рунге–Кутти та прогнозу-корекції, особливо при імітаційному моделюванні та у випадку, коли увага приділяється іншим аспектам алгоритмів БІНС.

Найбільш ефективним підходом при синтезі алгоритмів чисельного інтегрування кінематичних рівнянь орієнтації є використання методу Пікара. Для цього необхідно, по-перше, визначити порядок поліному, що апроксимує вектор кутової швидкості обертання основи – він характеризує «кроковість» методу. По-друге виконується інтегрування кінематичного рівняння з необхідною кількістю послідовних наближень – це складає порядок точності методу. У роботі наведено алгоритми інтегрування кінематичного рівняння Борца методом Пікара четвертого порядку точності і кроковістю від першого до четвертого включно, а також нові методи для матричного рівняння Пуассона.

У четвертому розділі розроблено імітаційну модель БІСО у середовищі Matlab, що дає можливість досліджувати точність різноманітних методів чисельного інтегрування. Структура моделі представлена на рис.3.

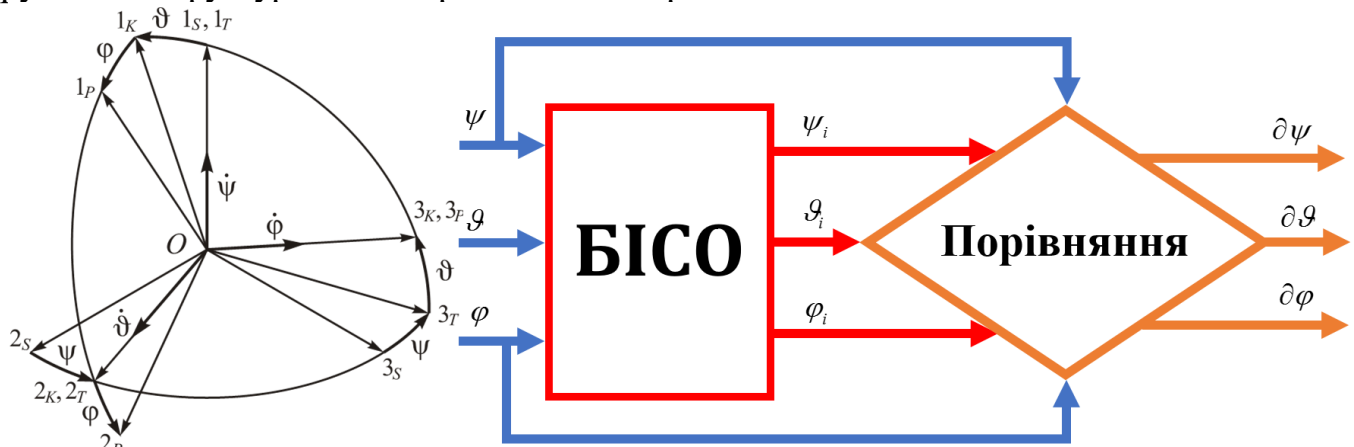


Рис.3 Імітаційна модель БІСО

Відповідний комп'ютерний алгоритм складається з таких програмних блоків:

- 1) блок, що моделює кутовий рух основи;
- 2) процедура, що імітує обчислювальний пристрій БІСО з вбудованим в нього досліджуваним алгоритмом;
- 3) блоку порівняння параметрів орієнтації, отриманих імітатором обчислювача, з ідеальними (модельними) значеннями цих параметрів, отриманих у блоці моделювання руху основи; отримання масиву значень похибок алгоритму як функцій часу.

Для дослідження точності методів інтегрування у роботі використано конічний рух основи, за якого відбуваються гармонічні кутові коливання виду: $\psi(t) \equiv 0$, $\theta(t) = a_m \sin(\omega t + \varepsilon)$; $\varphi(t) = a_m \sin(\omega t)$. Розглянемо випадок, коли основа коливається з амплітудою $a_m = 0,1 \text{ рад}$, частотою $\omega = 1 \text{ рад/с}$ та зсувом фази $\varepsilon = 90^\circ$, тоді при інтегруванні рівняння Пуассона (8) методом Рунге–Кутти четвертого порядку з кроком $h = 0,1 \text{ с}$ отримаємо суто алгоритмічний конічний дрейф БІСО, що наведено на рис.4.

Детальне дослідження конічного дрейфу показало, що максимальні значення дрейфу суттєво залежать від зсуву фази коливань ε . Так для методів парного поряд-

ку точності максимальні дрейфи спостерігаються при зсуві фази $\varepsilon = 90^\circ$, а для непарного – при $\varepsilon = 0^\circ$. Крім того, величина дрейфу суттєво залежить від кроку інтегрування та решти параметрів руху основи.

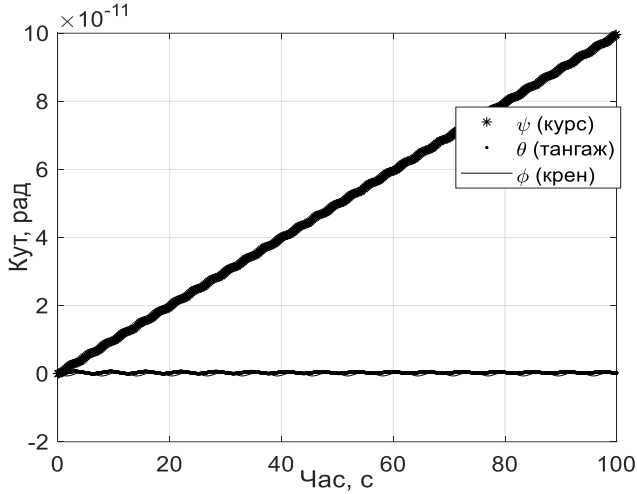


Рис.4 Конічний дрейф БІСО

Дослідження методів інтегрування дало змогу сформулювати емпіричну залежність величини максимального дрейфу у вигляді:

$$\left\langle \frac{d(\Delta\psi)}{dt} \right\rangle_{\max} = k \cdot \omega^{N+1} \cdot \mathcal{G}_m \cdot \varphi_m \cdot h^N, \quad (11)$$

де N – порядок точності методу; k – сталий коефіцієнт.

Для дослідження точності методів інтегрування зручно привести вираз (11) до безрозмірної форми:

$$\delta = k \cdot \mu^N, \quad (12)$$

де введено такі заміни: $\delta = \frac{1}{\omega \mathcal{G}_m \varphi_m} \left\langle \frac{d(\Delta\psi)}{dt} \right\rangle_{\max}$ – безрозмірний максимальний дрейф;

$\mu = \omega \cdot h$ – частотний параметр.

Використовуючи дані емпіричних досліджень та вираз (12), було запропоновано методику для дослідження та оцінки точності методів чисельного інтегрування: на основі імітаційного моделювання будувати графіки залежності відносних максимальних дрейфів похибок цих алгоритмів при синхронних коливаннях основи навколо двох ортогональних осей від частотного параметра. Саме цей максимальний відносний дрейф і характеризує точність методу. На основі моделювання необхідно знайти два параметри N і k , що визначають емпіричну степеневу залежність (12).

За цією методикою було досліджено точність методів Пікара для чисельного інтегрування рівняння Пуассона та відомих алгоритмів, розроблених А. П. Пановим. На рис. 5 у логарифмічному масштабі представлені графіки максимальних алгоритмічних дрейфів найточнішого двокрокового Панова, трикрокового (SAKS3h4) і чотирикрокового (SAKS4h4) методів інтегрування рівняння Пуассона. Усі методи мають четвертий порядок точності.

З рис.5 видно, що чотирикроковий алгоритм SAKS4h4 стрімко втрачає точність при збільшенні частотного параметру більше 0,1. Ця обставина не дозволяє гарантувати його точність при довільній динаміці об'єкту. Крім того, він вимагає виконання найбільшої кількості обчислень. Разом із цим, трикроковий метод інтегрування рівняння Пуассона дуже близький за точністю двокроковому методу Панова і навіть дещо його переважає.

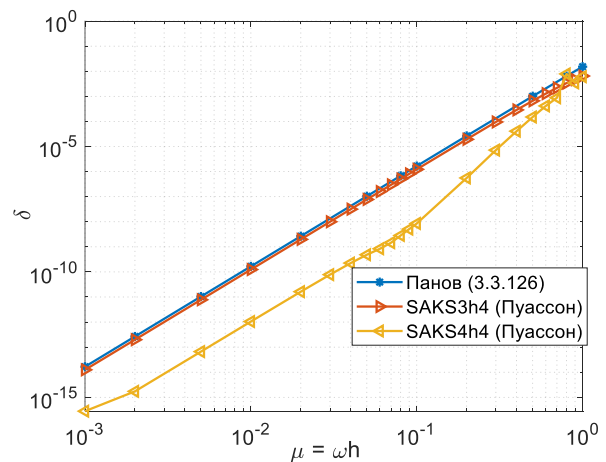


Рис. 5 Алгоритмічний дрейф методів інтегрування

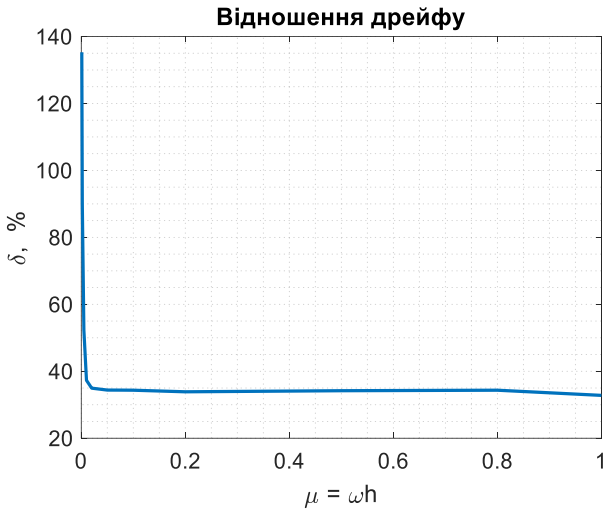


Рис. 6 Відношення дрейфу метода Панова до трикрокового алгоритму

рис.7. На ньому наведено результати імітаційного моделювання БІСО з найточнішим трикроковим алгоритмом SAKS3h4. Використовувався типовий крок опитування датчиків $h=0,005\text{ с}$ (200Гц), параметри руху основи при цьому були: $\vartheta_m = \varphi_m = 1^\circ$ та $\varepsilon = 90^\circ$.

З рис.7 видно: по-перше, що при частотах коливання основи більших за 15 Гц, величина алгоритмічного дрейфу сягає значень, що наближаються до точності прецизійних ДКШ і алгоритмічна компенсація необхідна; а по-друге, що зі збільшенням частоти коливання основи, формула (11) не описує дрейф адекватно – похибка стрімко накопичується.

Розширимо залежність (11) додавши уточнюючий коефіцієнт K_{dr}
 $K_{dr} = g \cdot \vartheta_m \cdot \varphi_m \cdot h^N \cdot \omega^{N+2}$. Тоді (11) набуде вигляду:

$$\left\langle \frac{d(\Delta\psi)}{dt} \right\rangle_{\max} = k \cdot \omega^{N+1} \cdot \vartheta_m \cdot \varphi_m \cdot h^N + K_{dr}, \quad (13)$$

Для оцінки коефіцієнта g для K_{dr} використовувався набір даних, що являється різницею між алгоритмічним дрейфом, отриманим в результаті моделювання та емпіричною моделлю (11). Для вибраного трикрокового алгоритму Пікара четвертого порядку коефіцієнт g становить $-5,1994 \cdot 10^{-13}$. Відмітимо, що за формулою (13) стало можливим відмовитись від модуля дрейфу – уточнюючий коефіцієнт K_{dr} враховує знак алгоритмічного дрейфу БІСО.

Для уточненої моделі дрейфу (13) проведемо аналогічне імітаційне моделювання при тих же параметрах руху основи і БІСО. Результати наведено на рис.8.

Відношення величин їх максимальних дрейфів наведені на рис.6.

Аналізуючи результати, представлені на рис.6 можна побачити, що трикроковий алгоритм Пікара для рівняння Пуассона в області середніх і високих значень частотного параметра (а при визначеному h в області середніх і високих частот), майже на 35% точніший.

Емпірична формула (11) досить точно описує максимальний дрейф БІСО при кінчному русі основи. Доцільно використати її для можливої алгоритмічної компенсації. І справді, кінчний дрейф може сягати значних величин, як показано на

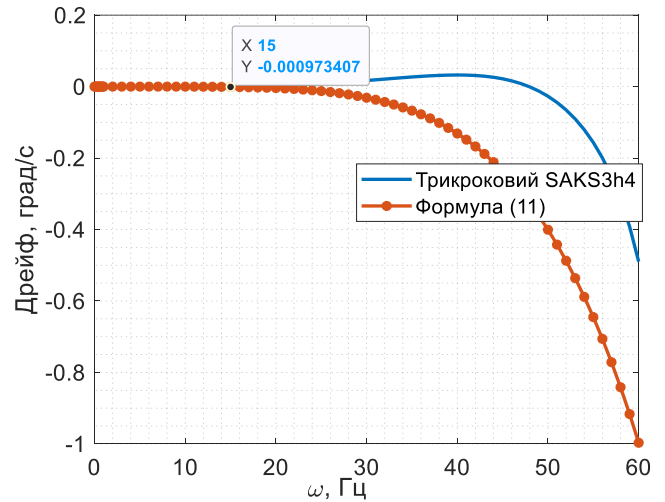


Рис.7 Алгоритмічний дрейф БІСО при збільшенні частоти руху

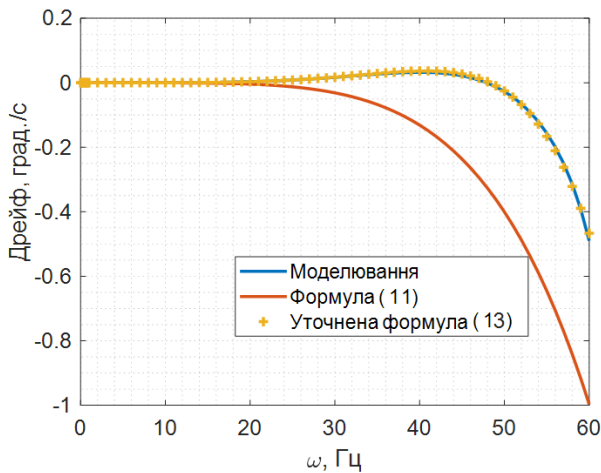


Рис. 8 Похибка БІСО за кінчного руху основи

З рис.8 видно, що уточнена формула з високою точністю повторює максимальний алгоритмічний дрейф БІСО на усьому діапазоні розглянутих частот. Використовуючи залежність (13) можна запропонувати методику корекції кінчної похибки системи: при появі кінчного руху основи необхідно визначити його амплітуди і частоту, розрахувати за аналітичною залежністю (13) алгоритмічний дрейф для конкретного методу інтегрування та відняти це значення від кута, навколо якого основа не рухається.

Найбільшу складність становить саме визначення зсуву фази коливань, адже амплітуду і частоту можна легко визначити за результатами інтегрування кінематичного рівняння. Ця задача вимагає більш детального дослідження.

Проведемо імітаційне моделювання для перевірки роботи запропонованої методики. Для цього задамо такий рух основи: амплітуда коливань $\vartheta_m = \varphi_m = 1^\circ$, частота $\nu = 20 \text{ Гц}$, зсув фази коливання $\varepsilon = 90^\circ$, крок опитування датчиків, а отже і крок інтегрування $h = 0,005 \text{ с}$ (200Гц). Результати наведено на рис.9.

З рис.9 видно, що запропонована методика дозволяє компенсувати кінчний дрейф системи більше ніж на порядок.

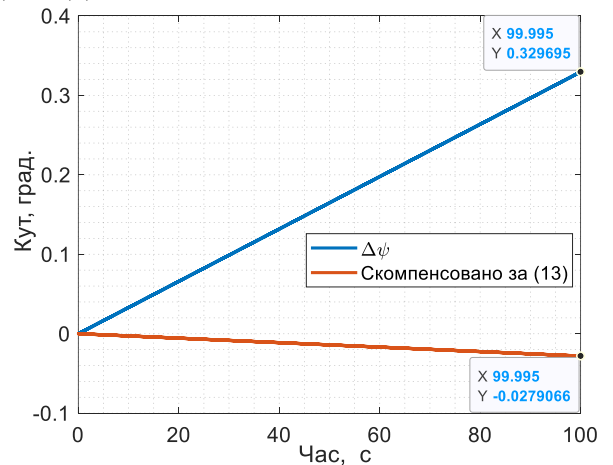


Рис.9 Компенсація кінчного дрейфу

У п'ятому розділі представлено синтез інформаційної моделі БІСО. Вона призначена для роботи з реальними сигналами БІНС та включає в себе усі необхідні процедури для коректної роботи. Схема розробленої інформаційної моделі БІСО представлена на рис.10.

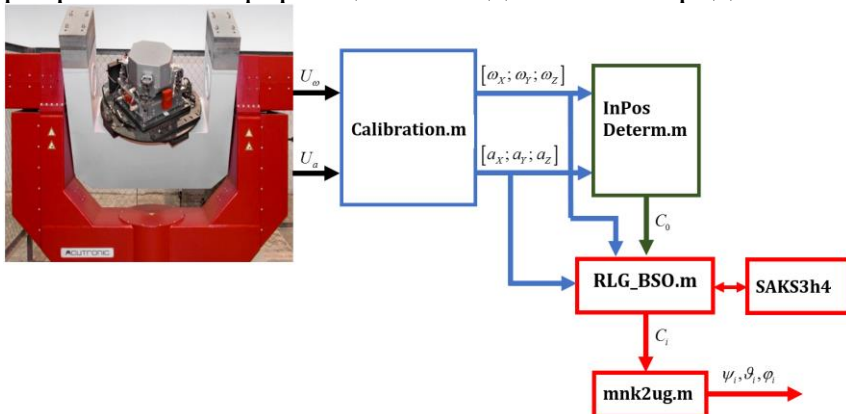


Рис.10 Структурна схема БІСО

фіцієнтів, отриманих методом просторового калібрування. Початкове значення МНК визначається у процедурі **InPosDeterm.m** методами горизонтування та

У роботі використано сигнали з ЧЕ БІНС виробництва КП СПБ «Арсенал». ІВМ складається з тріад лазерних гіроскопів RL-28A та акселерометрів АКС-05М. Вихідний сигнал ІВМ калібрується процедурою **Calibration.m**, використовуючи моделі (1) та (2), а також значення калібрувальних кое-

гірокомпасування. Керувальна програма **RLG_BSO.m** здійснює взаємозв'язок окремих процедур, а також розпочинає цикл чисельного інтегрування матричного рівняння Пуассона (8) трикроковим методом четвертого порядку, реалізованим у процедурі **SAKS3h4.m**. Для полегшення аналізу отриманих результатів, з поточних значень МНК розраховуються кути Ейлера–Крилова процедурою **mnk2ug.m**.

Перевірка моделі на адекватність проводилася у статичному режимі і система орієнтації показала уявний дрейф за відповідними кутами з точністю до $13,3''$ за 100 с роботи системи.

Подальші дослідження розробленої моделі проводилися у випадках обертання стенду навколо кожної з осей із заданою кутовою швидкістю, а також за конічних коливань. На рис.11 представлено результати моделювання для випадку обертання стенду зі сталою кутовою швидкістю навколо осі Z.

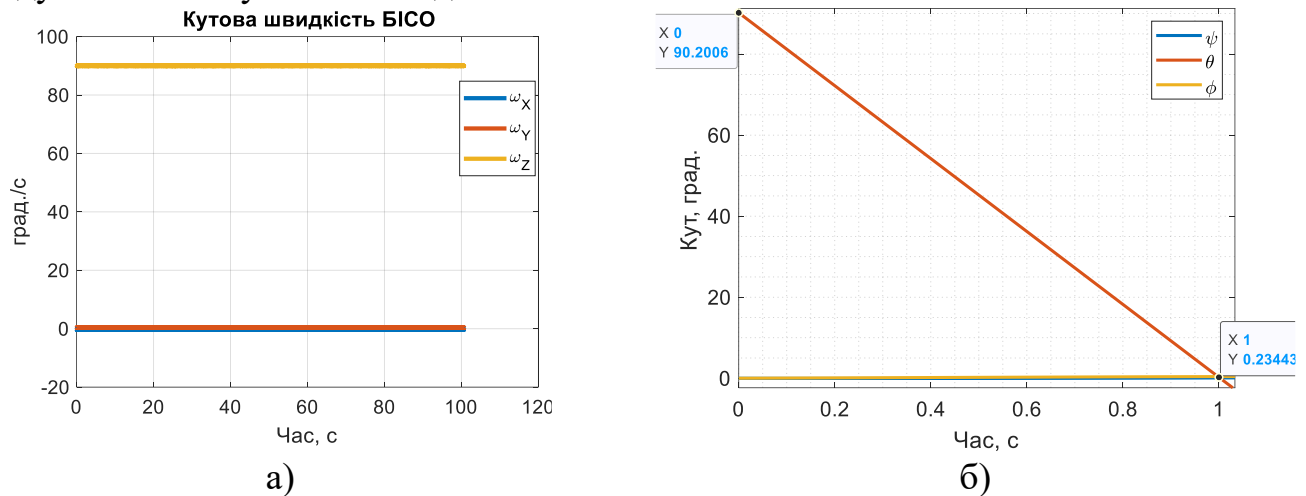


Рис.11 Обертання зі сталою кутовою швидкістю

На рис.11. а швидкість обертання стенда, виміряна ІВМ, склала $\omega_z = 89,967^\circ/\text{с}$. Зрозуміло, що за час 1 с стенд мав повернутися на кут $89,967^\circ$. Проте з рис.11. б видно, що БІСО показує приріст кута $\vartheta = 89,966^\circ$. Таким чином, похибка системи складає $0,001^\circ$.

На рис.12. а представлено результати роботи системи при конічному русі стенду з амплітудою $a_m = 1^\circ$ і частотою $\nu = 2$ Гц.

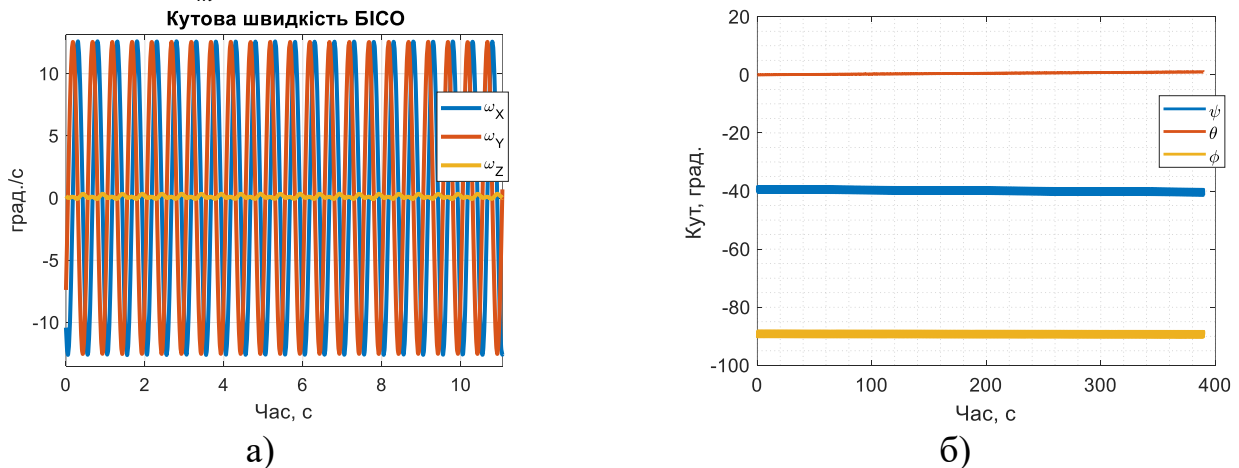


Рис.12 Конічне коливання стенду

З рис.12. б видно, що амплітуда коливань по куту рискання становить $\psi_a = 1,0480^\circ$, а по куту крену – $\varphi_a = 1,0382^\circ$. Конічний дрейф для заданого руху основи, розрахований за (13) становить лише $4,2618 \cdot 10^{-8}$ град. Ця величина набагато менша за похибки, викликані початковою виставою та сукупністю похибок ДКШ, тому на рис.12. б не спостерігається алгоритмічного дрейфу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу з підвищення точності безплатформних інерціальних навігаційних систем шляхом впровадження нових методів калібрування інерціального вимірювального модуля та нових високоточних методів чисельного інтегрування кінематичних рівнянь орієнтації.

1. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку інерціальних засобів орієнтації і навігації показав, що важливими шляхами підвищення точності безплатформних інерціальних навігаційних систем є удосконалення методів калібрування та впровадження нових алгоритмів чисельного інтегрування кінематичних рівнянь орієнтації, що не обмежуються швидкодією бортових обчислювачів. Показано, що метод корекції алгоритмічного дрейфу процедури інтегрування внаслідок конічного руху основи, що спирається на спеціальну «настройку» алгоритмів, а по суті емпіричному підборі коефіцієнтів алгоритму інтегрування не є оптимальним. І справді, алгоритми, що було сформовано таким чином показують високу точність при конічному русі, проте можуть вводити додаткову методичну похибку при звичайних еволюціях траєкторії об'єкту. Крім того показано, що розповсюджені методи інтегрування кінематичного рівняння Борца (вектору Ейлера єдиного повороту) не можуть однозначно визначати орієнтацію зв'язаної системи координат, а мають обов'язково використовуватись з додатковим векторним кінематичним параметром, як правило, кватерніоном повороту.

2. Ґрунтовне дослідження точності було проведено для нового просторового методу калібрування інерціальних вимірювальних модулів навігаційних систем. Метод спирається на одночасному калібруванні тривісного блоку акселерометрів та гіроскопів шляхом одночасного повороту стенду навколо трьох осей. Було розширено модель вихідного сигналу датчиків різноманітними похибками: нестабільністю масштабних коефіцієнтів, нестабільністю зміщення нулів, випадковим шумом. Разом із цим було враховано інструментальні похибки стендового обладнання: виставку стенду у певне задане положення, утримання заданої кутової швидкості, тощо. Дослідження точності просторового калібрування проводилося у порівнянні з відомими методами тестових поворотів та одновісному обертанні вимірювального модуля. Результати показують значне зниження середньоквадратичної похибки калібрування гіроскопів новим просторовим методом.

3. Показано сімейство нових алгоритмів інтегрування методом послідовних наближень Пікара для матричного кінематичного рівняння Пуассона. Наведено алгоритми для випадку вимірювання проекцій кутової швидкості; різної кроковості: три- і чотирикрокові методи; а також різного порядку точності (до четвертого включно).

4. Створено імітаційну модель безплатформної інерціальної системи орієнтації, що дозволяє проводити дослідження різноманітних методів чисельного інтегрування для різних кінематичних параметрів. Було сформульовано методику дослідження точності методів чисельного інтегрування. За нею розглянуто як відомі методи, що спираються на інтегруванні методом Пікара рівняння Борца (вектор Ейлера єдиного повороту), так і нові методи для рівняння Пуассона. Дослідження однозначно свідчать про те, що трикроковий метод Пікара четвертого порядку точності для рівняння Пуассона перевершує найточніший (і використаний на практиці в реальних навігаційних системах виробництва КП СПБ «Арсенал» та ін.) двокроковий метод четвертого порядку інтегрування рівняння Борца. Враховуючи, що матриця напрямних косинусів, що отримується при інтегрування рівняння Пуассона, однозначно описує орієнтацію об'єкту і може легко використовуватись як безпосередньо, так і для перепроєктування уявного прискорення, цей алгоритм виявляється найкращим.

5. На основі розглянутих методу просторового калібрування, алгоритму інтегрування кінематичного рівняння орієнтації було створено інформаційну модель безплатформної інерціальної системи орієнтації. Отримана модель включає процедури для калібрування сигналів інерціального вимірювального модуля, процедуру початкової виставки методами гірокомпасування та горизонтування, чисельне інтегрування кінематичного рівняння Пуассона методом Пікара. Було проведено серію моделювань розробленого програмного алгоритму з використанням реальних сигналів високоточної безплатформної інерціальної навігаційної системи на нерухомій основі, при обертанні навколо кожної вимірювальної осі, а також при кінцевому русі основи. Система продемонструвала адекватну роботу із точністю на рівні похибок вимірювачів.

6. Результати досліджень знайшли впровадження у КП СПБ «Арсенал», ТОВ «Гіротех», АТ «Елміз» в рамках розробок інерціальних систем орієнтації і навігації, а також в навчальному процесі кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лазарев Ю.Ф. О точности численного интегрирования уравнения ориентации Пуассона методами Рунге-Кутты и Пикара / Ю.Ф. Лазарев, А.Н. Сапегин // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – №3. – С. 133-139 (Входить до International Innovative Journal Impact Factor, Google Scholar).

Здобувачем проаналізовано точність отриманих методів чисельного інтегрування матричного рівняння Пуассона за умов кінцевого руху основи та отримано емпіричну залежність алгоритмічного дрейфу від параметрів методу інтегрування та руху основи.

2. Аврутов В.В. Метод калібрування і корекції вихідних сигналів тривісного акселерометра / В.В. Аврутов, С.В. Головач, О.М. Сапегін, М.Ю. Хутко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – №1. – С. 92–98 (Входить до WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, РІНЦ та EBSCO) DOI: 10.20535/1810-0546.2016.1.52999.

Здобувачем виконано імітаційне моделювання процедури калібрування вихідних сигналів акселерометрів.

3. Сапегин А.Н. Программная модель бесплатформенной системы ориентации на базе инерциального измерительного модуля MAX21105 / А.Н. Сапегин, Д.В. Бугаёв // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – №1. – С. 119-122 (Входить до International Innovative Journal Impact Factor, Google Scholar).

Здобувачем виконано імітаційне моделювання роботи бесплатформної інерціальної системи орієнтації з використанням сигналів мікромеханічних чутливих елементів та алгоритмів інтегрування Рунге–Кутти кінематичного рівняння Пуассона.

4. Сапегін О.М. Безплатформна інерціальна навігаційна система на основі динамічно настроєних гіроскопів / О.М. Сапегін, М.О. Романов, Д.В. Бугайов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – №6. – С. 94–100 (Входить до WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, РИНЦ та EBSCO) DOI: 10.20535/1810-0546.2016.6.81064.

Здобувачем створено імітаційну модель і досліджена робота бесплатформної інерціальної системи орієнтації з використанням моделювання динамічно настроєних гіроскопів та алгоритмів інтегрування Рунге–Кутти кінематичних рівнянь Пуассона та Борца (вектору Ейлера).

5. V.V. Avrutov, A.N. Sapegin, Z.S. Stefanishin, V.V. Tsisarzh. Calibration of Inertial Measurement Unit // International Applied Mechanics, Vol.53, No.2, March, 2017. – pp.228–236 (Входить до Scopus). DOI: 10.1007/s10778-017-0808-4.

Здобувачем виконано імітаційне моделювання процедури просторового калібрування вихідних сигналів акселерометрів та гіроскопів.

6. Сапегін О.М. Алгоритм бесплатформної інерціальної системи орієнтації на лазерних гіроскопах / О.М. Сапегін, М.В. Норенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2017. – №2. – С. 108–113 (Входить до WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, РИНЦ та EBSCO) DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.96257.

Здобувачем виконано імітаційне моделювання роботи бесплатформної інерціальної системи орієнтації з використанням реальних сигналів високоточної навігаційної системи та алгоритмів інтегрування Рунге–Кутти кватерніонного кінематичного рівняння та матричного рівняння Пуассона.

7. Сапегін О.М. Мікромеханічний інклінометр / О.М. Сапегін, Г.Ю. Строкач // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – 2020. – Вип.59(1) – С.24–29 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших) DOI: 10.20535/1970.59(1).2020.210007.

Здобувачем розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення для роботи інклінометру, що ґрунтується на інтегруванні методом прямокутників матричного рівняння Пуассона та корекції дрейфів мікромеханічних гіроскопів комплементарним фільтром за сигналами акселерометрів.

8. Avrutov V. Inertial Position Determination Under Vibration / V. Avrutov, S. Lakoza, L. Ryzhkov, O. Sapegin // Vibrations in Physical Systems, 2020, 31(2), 2020201, P: 1–10 (Польща, Входить до Scopus).

Здобувачем запропоновано алгоритм та імітаційну модель для визначення орієнтації системи, проведено імітаційне моделювання.

9. Lazarev Y. Precision quaternion based one step strapdown attitude algorithm / Y. Lazarev, V. Avrutov, P. Mironenko, S. Davydenko, O. Sapegin // Вісник НТУУ «КПІ»,

Серія Приладобудування. – 2020. – Вип.60(2) – С.5–15 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших)

DOI: 10.20535/1970.60(2).2020.221274.

Здобувачем проведено дослідження точності розробленого однокрокового методу чисельного інтегрування кватерніонного рівняння.

10. Безплатформна система орієнтації: Свідоцтво №62912 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма / Сапегін О.М., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Сапегін О.М., Півторак Д.О. – Зареєстровано 10.12.2015 у державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

Здобувачем запропоновано програмне забезпечення для безплатформної інерціальної системи орієнтації.

11. Безплатформна система орієнтації на базі динамічно налагоджених гіроскопів: Свідоцтво №64219 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма / Сапегін О.М., Романов М.О., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Сапегін О.М., Романов М.О., Півторак Д.О. – Зареєстровано 26.02.2016 у державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

Здобувачем запропоновано програмне забезпечення для проведення імітаційного моделювання безплатформної інерціальної системи орієнтації з використанням диференціальних рівнянь руху динамічно налагоджених гіроскопів та чисельного інтегрування методами Рунге–Кутти рівнянь орієнтації Пуассона та Борца.

12. Мікромеханічна безплатформна система орієнтації: Свідоцтво №64218 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма / Сапегін О.М., Бугайов Д.В., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Сапегін О.М., Бугайов Д.В., Півторак Д.О. – Зареєстровано 26.02.2016 у державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

Здобувачем запропоновано програмне забезпечення для синтезу безплатформної інерціальної системи орієнтації з блоку мікромеханічних чутливих елементів та чисельного інтегрування методами Рунге–Кутти рівняння орієнтації Пуассона.

13. Інтегрування алгоритму орієнтації методом Рунге–Кутта: Свідоцтво №65194 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма / Сапегін О.М., Бугайов Д.В., Півторак Д.О. (Україна); заявник та власник Сапегін О.М., Бугайов Д.В., Півторак Д.О. – Зареєстровано 5.05.2016 у державному реєстрі свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

Здобувачем запропоновано програмне забезпечення для синтезу процедури чисельного інтегрування різноманітних кінематичних рівнянь методами Рунге–Кутти.

14. Avrutov V. Strapdown Latitude and Longitude Finder / V. Avrutov, S. Lakoza, O. Sapegin / In. Prog. IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 2020, P: 29–33 (Входить до Scopus) DOI: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255597.

Здобувачем запропоновано алгоритм та імітаційну модель для визначення орієнтації системи, проведено імітаційне моделювання.

15. Sapegin O. Latitude Autonomous Determination on Fixed Base with Varied Attitude / O. Sapegin, S. Lakoza, V. Avrutov, D. Buhaiov // In. Prog. Int. Conf. of Young Professionals «GeoTerrace-2020», 2020, Dec.2020, Vol. 2020, P:1–5 (Входить до Scopus) DOI: 10.3390/s17092146.

Здобувачем розроблено імітаційну модель для визначення орієнтації системи, проведено імітаційне моделювання.

16. Сапегін О.М. Актуальні проблеми у проектуванні алгоритмів сучасних безплатформових інерціальних навігаційних систем / О.М. Сапегін // Приладобудування – 2015: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2015. – С.29–30.

Здобувачем сформульовано необхідність розробки нових методів чисельного інтегрування рівнянь орієнтації.

17. Сапегін О.М. Проектування точних алгоритмів сучасних безплатформових інерціальних навігаційних систем / О.М. Сапегін // Восьма міжнар. наук.-практ. конф. «ПРТК-2015» : Зб. тез. – Київ: НАУ, 2015. – С.51–53.

Здобувачем сформульовано основні підходи для розробки вискоточних алгоритмів чисельного інтегрування кінематичних рівнянь.

18. Сапегін О.М. Моделювання системи орієнтації на базі MAX21105 / О.М. Сапегін // Приладобудування – 2016: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2016. – С.23–24.

Здобувачем проведено дослідження точності розробленого алгоритму та програмного забезпечення для безплатформної інерціальної системи орієнтації на мікромеханічних чутливих елементах

19. Сапегін О.М. Програмна модель системи орієнтації на базі MAX21105 / О.М. Сапегін, Д.В. Бугайов // Дев'ята міжнар. наук.-практ. конф. «ПРТК-2016» : Зб. тез. – Київ: НАУ, 2016. – С.55–56.

Здобувачем представлені результати імітаційного моделювання безплатформної інерціальної системи орієнтації.

20. Сапегін О.М. Програмна модель системи орієнтації на базі динамічно налагоджуваних гіроскопів / О.М. Сапегін, М.О. Романов // Дев'ята міжнар. наук.-практ. конф. «ПРТК-2016» : Зб. тез. – Київ: НАУ, 2016. – С.57–58.

Здобувачем представлено імітаційну модель безплатформної системи орієнтації на динамічно налагоджених гіроскопах, що ґрунтується на інтегруванні кінематичних рівнянь Пуассона і Борца.

21. Сапегин А.Н. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основе прецизионных микромеханических датчиков / А.Н. Сапегин, М.В. Норенко // Мат. 9-й Межд. научно-техн. конф. «Приборостроение». Минск, 2016. Том 2. С. 120–122.

Здобувачем проаналізовано можливість розробки систем орієнтації на основі вискоточних мікромеханічних чутливих елементів.

22. Сапегін О.М. Безплатформова інерціальна навігаційна система на динамічно налагоджених гіроскопах / О.М. Сапегін, О.С. Бельський // Друга Українська наук.-техн. конф. «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи» Зб. тез. Київ, Україна –К.:КП СПБ «Арсенал» 2016.– С. 89–90.

Здобувачем проаналізовано точність безплатформної системи орієнтації на динамічно налагоджених гіроскопах.

23. Сапегін О.М. Програмне моделювання безплатформової системи орієнтації на лазерних гіроскопах / О.М. Сапегін // Приладобудування – 2017: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : Зб. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2017. – С.24–25.

Здобувачем представлено результати імітаційного моделювання безплатформної системи орієнтації, що використовує сигнали з лазерних гіроскопів.

24. Сапегін А.Н. Калибровка блока лазерных гироскопов на неподвижном основании / А.Н. Сапегін, В.М. Шелевер // Мат. 10-й Межд. научно-техн. конф. молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения». Минск – 2017 Том 2. С. 124.

Здобувачем проаналізовано можливість проведення калібрування високоточних датчиків кутової швидкості на нерухомій основі.

25. Сапегін О.М. Конічний рух інерціального вимірювального модуля / О.М. Сапегін // Приладобудування – 2018: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф. : 3б. тез. – Київ: НТУУ "КПІ", 2018. – С.25.

Здобувачем проведено аналіз алгоритмічного дрейфу алгоритму орієнтації в наслідок конічного руху.

26. Строкач Г.Ю. Кутомір на основі акселерометру ADXL-335 / Г.Ю. Строкач, О.М. Сапегін // Погляд у майбутнє приладобудування. 3б. тез доп. наук.-практ. конф. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С.46–48.

Здобувачем запропоновано алгоритм мікромеханічного кутоміра, що ґрунтується на процедурі гірокомпасування та горизонтування платформних інерціальних навігаційних систем.

27. Сапегін, О. М. Аналіз швидкодії алгоритмів безплатформних інерціальних систем орієнтації / Сапегін О. М., Яковенко В. А. // XIX Міжн. наук.-техн. конф. «Приладобудування: стан і перспективи», 13-14 травня 2020 р., Київ, Україна : 3б. мат. конф. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 17–19.

Здобувачем проведено аналіз швидкодії алгоритмів чисельного інтегрування Рунге–Кутти другого і четвертого порядків для кватерніонного кінематичного рівняння і матриць напрямних косинусів.

28. Строкач Г.Ю. Фільтр Маджвіка в алгоритмі інклінометра / Г.Ю. Строкач, О.М. Сапегін // Дванадцята міжн. наук.-практ. конф. «ПРТК-2020» 3б. тез. Київ, Україна –К.:НАУ, 2020.– С.258–260.

Здобувачем запропоновано алгоритм мікромеханічного інклінометру з корекцією дрейфів нулів гіроскопів з використанням фільтра Маджвіка.

29. Строкач Г.Ю. Кутомір на основі мікромеханічного інерціального вимірювального модуля / Г.Ю. Строкач, О.М. Сапегін // 3б. пр. XIII наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020, К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. С.67–70.

Здобувачем запропоновано алгоритм мікромеханічного інклінометру, що ґрунтується на чисельному інтегруванні кінематичного рівняння Пуассона методом прямокутників.

30. Строкач Г.Ю. Комплементарний фільтр для мікромеханічного інклінометру / Г.Ю. Строкач, О.М. Сапегін // Проблеми та перспективи реалізації та впровадження міждисциплінарних наукових досягнень: мат. міжн. наук. конф. (Т. 1), Київ, Україна: МЦНД. С 58 – 60.

Здобувачем запропоновано алгоритм мікромеханічного інклінометру з корекцією дрейфів нулів гіроскопів з використанням комплементарного фільтра.

АНОТАЦІЯ

Сапегін О.М. Вдосконалення методів і алгоритмів визначення параметрів орієнтації для безплатформної інерціальної навігаційної системи. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена розробці інформаційної моделі для визначення параметрів орієнтації, що може використовуватись при синтезі алгоритмічного і програмного забезпечення високоточних БІНС.

Проведено детальне обґрунтування і дослідження методів калібрування ЧЕ: акселерометрів і гіроскопів. Підтверджено високу точність методу просторового калібрування інерціального вимірювального модуля.

Розроблено імітаційну модель безплатформної інерціальної системи орієнтації, що містить процедури моделювання кутового руху основи, чисельного інтегрування кінематичних рівнянь та блоку оцінки отриманих результатів. Отримано емпіричну залежність для оцінки точності методів інтегрування. Запропоновано методику компенсації алгоритмічного дрейфу БІСО внаслідок кінчного руху основи.

Побудовано інформаційну модель БІСО, що спрямована на роботу з реальними сигналами вимірювального модуля навігаційної системи. Програмний алгоритм містить комплекси процедур для калібрування вихідних сигналів ЧЕ, розрахунку початкового значення матриці напрямних косинусів та розрахунку параметрів орієнтації об'єкту шляхом чисельного інтегрування методом Пікара кінематичного рівняння Пуассона. Інформаційна модель підтвердила адекватну роботу та достатню точність при роботі на нерухомій основі та при динамічному русі.

Ключові слова: безплатформна інерціальна системи орієнтації, метод Пікара, рівняння Борца, рівняння Пуассона, калібрування.

SUMMARY

Sapegin O.M. Improvement of methods and algorithms for determining attitude parameters for strapdown inertial navigation system. — Manuscript copyright.

Thesis for a candidate degree in specialty 05.11.03 — Gyroscopes and navigation systems. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis describes the development of an information model for determining the orientation parameters of high precision SINS.

A detailed substantiation and study of methods for calibration of sensitive elements: accelerometers and gyroscopes. It was created the simulation model, which allows studying different calibration methods. The mathematical model of sensors output signal was increased by adding stands and sensors errors. It was compared the eight-position method for accelerometer calibration with new spatial method. One axis rotation method for gyroscopes calibration was compared with spatial calibration approach as well. Mean values and standard deviation of method's errors according to stand equipment and sensors

hardware random errors was studied. The specifications of real navigation accelerometer and ring laser gyroscope were used for testing calibration methods. The high accuracy of the spatial calibration method of the inertial measuring unit in comparison with the well-known ones is confirmed.

The main approaches to synthesis of attitude algorithms presented. It was described the main types of attitude kinematic parameters such as directional cosines matrix, Euler's rotation vector and quaternions. All of these parameters describe the same attitude of body frame about inertial frame. Transformations of some parameters into others were shown as well transformations into Euler–Krylov. Different methods of numerical integration of attitude equations such as low accurate squares and trapeziums, predictor–corrector Runge–Kutta and Picard methods were presented.

A simulation model of a strapdown inertial attitude system has been developed. The model contains procedures for modeling an angular motion of the base, numerical integration of kinematic equations and a block for comparing and studying the obtained results. It was tested a several Picard methods for integration of Bortz's equation with different integration steps. This well-known methods was compared with Picard methods for Poisson's kinematic equation. All tests were made for conning motion, which is the most dangerous for all types of inertial systems. In consist of two harmonic angular oscillations around two body axes. It leads to an algorithm drift of the third angle. An empirical dependence the error drift was obtained. It makes possible to assess the accuracy of any integration method. Research shows, the use of the three-step Picard method of the fourth accuracy order for the integration the Poisson's kinematic equation is the best for the synthesis of the attitude system algorithmic software. A method for compensating the algorithmic drift of attitude system due to the conning motion of the base is proposed. This method allowed to compensate the algorithmic drift more than an one order.

An information model of a strapdown inertial attitude system is constructed. It was designed to work with real signals of the inertial measuring unit of the navigation system. The software algorithm contains a set of procedures for calibrating the output signals of sensitive elements, calculating the initial value of the directional cosines matrix by conducting an initial exhibition and calculating the kinematic parameters of object attitude by numerical integration the Poisson's kinematic equation by Picard's method. The output signals of accelerometers and ring laser gyroscopes of high-precision SINS were used for testing and studying the model. The information model confirmed its adequacy by working on a fixed base. System was showed the imaginary drift of attitude, according to real local values of Earth's angular rate projections. The integration algorithm was expanded to consider this imaginary drift. Information model of attitude system was tested by constant angular rotation of the stand around each axis. The errors of system were in the accuracy orders of gyroscopes, which showed the great accuracy of software. Final tests were made for conning motion of base. It was several different motions with their own amplitudes and frequencies but the phase was ninety degrees. System showed the great accuracy, but conning frequencies was not big enough to see an algorithm drift.

Keywords: strapdown inertial attitude system, Picard's method, Bortz's equation, Poisson's equation, calibration.